

柔軟弾性体エンドミル加工における加工誤差の統計的モデリング

室蘭工業大学 WU ZEJIAN, 荒木拓磨, 寺本孝司

要 旨

ゴムに代表される柔軟弾性体の高精度切削加工を実現するためには、加工誤差の定量的なモデルの構築が必要とされている。本報では、切削力と変形量を考慮した統計的なモデルを基にした予測の可能性を、異なる加工条件で得られた加工誤差に対する予測結果の評価により検討した。

1. はじめに

近年、柔軟弾性体材料の切削加工が注目されている。切削加工では、金型を必要としないことから、小ロット生産に適し、製品の試作や少数化生産への利点が期待されている。しかし、柔軟弾性体を切削加工する時の問題点として、過大な加工誤差が挙げられる。

これまでの研究から、加工誤差の要因として切削中の工作物変形と切りくず分離における誤差が指摘されている¹⁾。これらの誤差要因を同定するために、基本的な加工状況の計測として工作物変形と切削力の同期計測に関する検討が行われてきた²⁾。具体的には、柔軟弾性体の直刃エンドミルによる準二次元切削を行い、加工中の切削力や工作物の変形量を計測するとともに、加工前後の形状を非接触形状測定機で計測して加工誤差を計測することが可能となっている²⁾。本研究では、柔軟弾性体のエンドミル加工中に計測された物理量と加工誤差の統計的なモデル化について検討を行った。

2. 切削加工実験

2.1 実験概要

本実験では、マシニングセンタを用いて、硬度 90° のウレタンゴムを、工具径 6mm の 2 枚刃直刃エンドミル (HSS, 刃先丸み約 20 μ m) で切削加工した。

図 1 に実験装置の概略図を示す。実験は、硬度や形状を変更したウレタンゴム試験片を、加工条件を変更して切削した。実験における加工条件を表 1 に示す。

加工実験では、両面テープを使用して金属性の土台に固定した試験片を、動力計を介してマシニングセンタに取り付け、エンドミル加工を行う。加工中には、鏡に反射した試験片側面を高速カメラで撮影した後、画像処理により試験片の変形を計測する。計測にあたっては高速カメラ起動のトリガ信号を、同期信号として切削力計測用のデータロガーにも送信することで、切削力と工作物変位の同期を行う。

試験片の切削は序盤・中盤・終盤の 3 区間に分けて行い、工具の回転方向は主軸の移動方向と切削方向が逆になるダウンカットとした。図 2 の赤い丸で示した 3 つのマーカが右から序盤・中盤・終盤で計測するマーカであ

る。それぞれマーカは切削開始位置から、3mm, 11mm, 17mm の地点を指す。また、工作物の側面に直径 1mm, 間隔 1mm のマーカを貼り付け、画像処理による工作物変形量の算出を行った。切削中は鏡に切りくずが降りかからないよう常に鏡にエアーを吹き付けることで撮影に影響がないようにした。

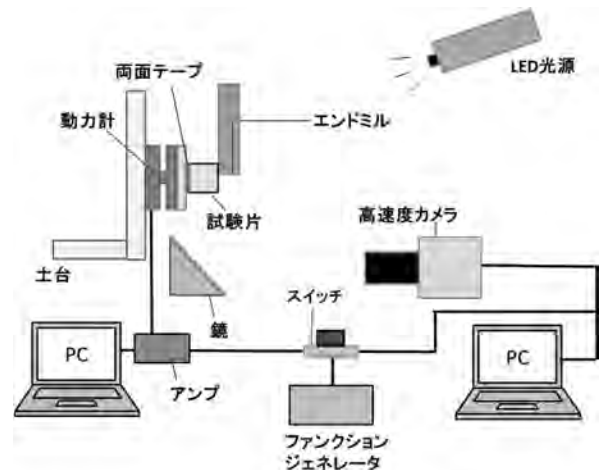


図 1 実験装置の概要

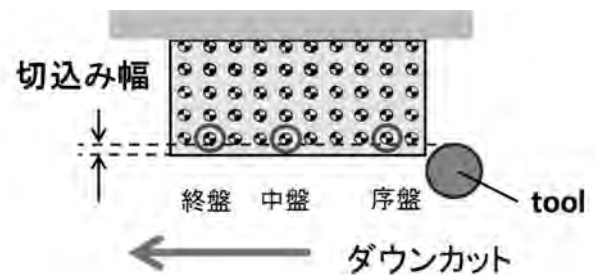


図 2 加工の概要と計測位置

表 1 加工条件

| 加工方向 | ダウンカット | | | |
|----------------|---------|----------|----------|----------|
| 回転数[rpm] | 4000 | | | |
| 一刃送り[mm/tooth] | 0.0094 | 0.0125 | 0.0188 | 0.025 |
| 切り込み幅[mm] | 1 | | | |
| 切り込み深さ[mm] | 5 | 10 | | |
| 工作物形状[mm] | 5×10×20 | 10×10×20 | 10×15×20 | 10×20×20 |

2.2 切削実験の結果

加工中に計測した切削力、工作物変形量は同期をとったうえで、工具 2 周期分のデータをグラフ化した。加工条件硬度 90°, 寸法 10×15×20 (回転数 4000[rpm], 一刃送り速度 0.0125[mm/tooth]), 切削位置 3mm 近付での y 軸の結果を図 3 に示す。

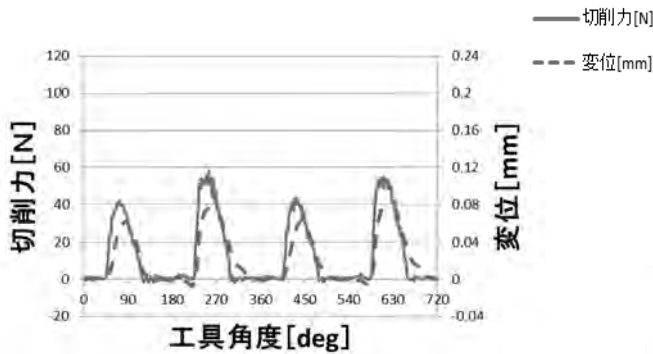


図 3 寸法 10×15×20 工作物の切削力と変位データ

3 加工モデリング

3.1 加工誤差モデル構築

実験で計測した切削力、工作物変位から加工誤差のモデル化を行う。モデル構築には重回帰分析を用い、非接触形状測定器を用いて加工前後の工作物形状を計測した工作物加工面の加工誤差を目的変数とする。重回帰分析における説明変数の選定に当たっては、説明変数が多いほど重回帰式全体の精度を向上するものの、係数同定のために必要となる実験が増加することから、今回の検討では、工作物変形に影響が一番大きいと考えられる加工面創成時における加工位置直下の y 軸変形量と、工具切れ刃が加工面を創成している時点での y 軸切削力を用いて、重回帰分析を行った。これらの物理量は、加工シミュレーションにより事前予測の可能性がある、少数の実験により複雑な形状の加工にも適用が可能となると考えられる。重回帰分析の実施にあたっては以下の式をモデルとして分析を行った。

$$Y = a_1 X_1 + a_2 X_2 + a_0$$

ここで、モデル式の X_1 : y 軸変形量, X_2 : y 軸切削力と変形量の比として、偏回帰係数(a_1 , a_2) と切片 a_0 を求める。

3.2 加工誤差モデルの評価

重回帰分析によって求められたモデル式は y 軸変位, y 軸切削力と変形量の比, 3 つのパラメータで構成されている。そのため, 4 つ以上の実験結果からパラメータチューニングを行わなければならない。今回は, 表 1 に示した一刃当たりの送りと工作物形状を組み合わせた 16 条件 (1 条件には序盤, 中盤, 終盤合計 3 組のデータで構成する) のうち, 5 条件の結果をもとにパラメータ同

定を行い, 加工誤差のモデル式を構築した。

構築したモデル式に, 残りの 11 個の条件での工作物変位と切削力の実験結果を代入して加工誤差を推定した。そして, 推定した加工誤差と, 計測した加工誤差を比較して加工誤差モデルを評価した。図 4 にモデル式の評価結果の一例を示す。図 4 の横軸は, 加工条件と計測位置を表している。なお, 図 4 に示す工作物形状が 10×15×20 の実験結果は, パラメータ同定に使用していない。

図 4 における各モデル式の推定値と計測値の誤差は平均すると 20%~30%となった。よって, 今回の実験では, 概ね 70%以上の精度で加工誤差の予測が可能であることがわかった。

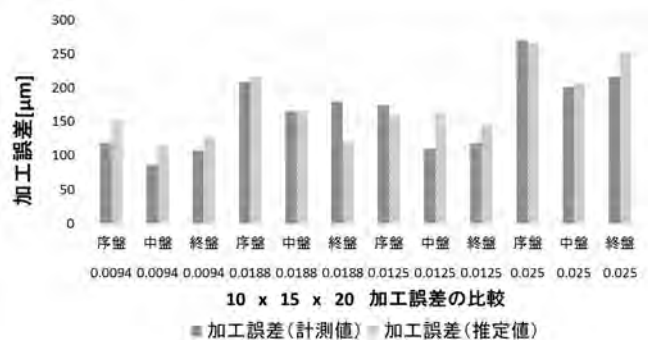


図 4 加工誤差の評価結果

4 結言

本研究では, 柔軟弾性体のエンドミル加工における加工誤差の統計的なモデル化について検討した。まず, 直刃エンドミルによる準二次元切削を行い, 加工中の切削力や工作物の変形量の計測と加工誤差の計測を行った。そして, 異なる加工条件で得られた加工誤差に対して, 切削力, 変形量を基にした統計的なモデル化の可能性について検討を行った。結果として, 加工条件が違う場合でも概ね予測が可能であることが分かった。しかし, いくつかの条件では, 推定誤差が 50%近くとなるような大きく推定が異なる場合があった, 今後は, 予測が大きく異なる加工条件の加工状況を分析する必要がある。さらに, 今後の研究課題としては, 工作物変形および切削力のシミュレーション結果を用いた予測の実現についての検討が挙げられる。

参考文献

- 1) 荒木 拓磨, 寺本 孝司, 柔軟弾性体のエンドミル加工における加工誤差への切りくず分離誤差の影響, 2015 年度精密工学会秋季大会(2015)
- 2) 荒木 拓磨, 寺本 孝司, 磯村 誠, 柔軟弾性体のエンドミル加工における工作物変形と加工誤差の計測, 日本機械学会 第 10 回 生産加工・工作機械部門講演会講演論文集 (2014)